

La fertilité des sols et son évolution Zone cotonnière du Tchad

L. Richard* et B. Djoulet**

* Ingénieur agronome, Docteur Ingénieur, I.R.C.T.-SOCADA, B.P. 997, Bangui, R.C.A.

** Ingénieur I.R.C.T., B.P. 31, Bébedjia Tchad.

RÉSUMÉ

L'étude de la fertilité peut être abordée suivant divers aspects ; pour l'agronome et le pédologue, le rendement des cultures et la composition du sol sont des critères de la fertilité interdépendants que l'on peut suivre dans le temps en un lieu donné ou observer dans l'espace. Dans cette étude, la forte variabilité des rendements du cotonnier au Tchad provoquée expérimentalement et observée

régionalement reçoit des explications très voisines. On met en évidence le rôle essentiel de la matière organique du sol et l'incidence du potassium échangeable sur le niveau de production. Des systèmes de cultures sont proposés et expérimentés, ils conduisent à des rendements attractifs pour le cultivateur et sont vraisemblablement conservateurs de la fertilité du sol.

MOTS CLÉS : évolution fertilité, cotonnier Tchad, rendements, analyse sol, explication variabilité, système culture, jachère, intégration bétail.

INTRODUCTION

La fertilité d'un sol est une notion très concrète à laquelle tous les cultivateurs sont sensibles ; elle se caractérise par sa faculté de production.

Cette fertilité n'est cependant pas immuable ; le climat, la gestion et l'exploitation du sol contribuent à son évolution dont la véritable nature est souvent difficile à identifier. Le cultivateur parle de « fatigue » mais l'agronome et le pédologue doivent analyser la notion de fertilité, rechercher les facteurs de son évolution et proposer les méthodes correctives.

Les risques de fatigue et même d'épuisement d'un sol sont élevés en milieu tropical. Il est possible, sans doute, d'en masquer les effets par des pratiques culturales améliorées et des fertilisations accrues ; il n'en demeure pas moins que la faculté naturelle de production a subi une atteinte momentanée voire définitive. Même avec des résul-

tats immédiats séduisants, un système de production qui conduirait à un appauvrissement progressif des sols serait à rejeter.

Dans une région donnée, l'étude de la fertilité et de son évolution peut être abordée suivant deux aspects :

- Evolution locale de la fertilité provoquée expérimentalement par divers modes d'exploitation.
- Description et analyse de la fertilité et de sa variabilité géographique.

C'est de ce double point de vue que l'IRCT a conduit une étude au Tchad, sur la Station de Bébedjia et sur l'ensemble de la zone cotonnière. Elle nous a permis de proposer des systèmes de cultures cohérents et, en principe, conservateurs de la fertilité ; ils ont été implantés en vraie grandeur pour en vérifier la validité.

I. ÉVOLUTION DE LA FERTILITÉ DANS UN ESSAI PLURIANNUEL (BEBEDJIA 1963 à 1978)

1. But de l'essai

L'essai X a été mis en place en 1963 pour étudier l'effet d'une jachère naturelle sur les rendements du cotonnier et du sorgho en présence de quatre modes de fertilisation.

2. Le sol

L'essai est implanté sur un sol ferrallitique sablo-argileux profond dans une séquence où ces sols rouges sont distribués sur les parties hautes du paysage. Les sols beiges sur les glacis ou versants à pente faible aboutissent au niveau des zones d'inondation. L'extension géographique des séquences de sols rouges et beiges correspond en majeure partie au Continental Terminal (Y. CHATELIN, ORS-TOM). Ces sols sont dénommés localement « koro ».

3. Dispositif expérimental

— Objets principaux

- Rotation = A - coton
B - coton-sorgho
C - coton-sorgho - coton-sorgho - 2 années
jachère
D - coton-sorgho - 4 années de jachère

Jachère = La jachère naturelle est composée de graminées (dominante andropogonées en 2^e année) et de quelques légumineuses. Très fréquemment, au cours des 15 années de l'étude, cette jachère a subi le passage des feux en saison sèche.

— Objets secondaires

Fertilisation du cotonnier (tabl. 2).

 a_1 a_2 b_1 b_2

— Répétition

I

II

III

— Séries

S1 à S6

La rotation D tourne sur 6 années ; pour avoir une représentation annuelle complète de chaque rotation l'expérimentation est implantée en 6 séries. L'ordre des cultures est de l'une à l'autre décalé d'un an et chaque série représente 1 essai avec ses 3 répétitions I, II et III (tabl. 1 : répartition des cultures).

4. Analyse des rendements du cotonnier

a) Culture continue et cycles de production

Dans le tableau 1 nous disposons de 77 situations où le cotonnier est cultivé chaque année sans jachère et sans

TABLEAU 1. — Succession des cultures.

Série	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Année	1963	1964	1965	1966	1969	1970
culture	A B C D	A B C D	A B C D	A B C D	A B C D	A B C D
1963	C C C1 C					
1964	C S S S	C C C1 C				
1965	C C C2 —	C S S S	C C C1 C			
1966	C S S —	C C C2 —	C S S S	C C C1 C		
1967	C C — —	C S S —	C C C2 —	C S S S		
1968	C S — —	C C — —	C S S —	C C C2 —		
1969	C C C1 C	C S — —	C C — —	C S S —	C C C1 C	
1970	C S S S	C C C1 C	C S — —	C C — —	C S S S	C C C1 C
1971	C C C2 —	C S S S	C C C1 C	C S — —	C C C2 —	C S S S
1972	C S S —	C C C2 —	C S S S	C C C1 C	C S S —	C C C2 —
1973	C C — —	C S S —	C C C2 —	C S S S	C C — —	C S S —
1974	C S — —	C C — —	C S S —	C C C2 —	C S — —	C C — —
1975	C C C1 C	C S — —	C C — —	C S S —	C C C1 C	C S — —
1976	C S S S	C C C1 C	C S — —	C C — —	C S S S	C C C1 C
1977	C C C2 —	C S S S	C C C1 C	C S — —	C C C2 —	C S S S
1978	C S S —	C C C2 —	C S S S	C C C1 C	C S S —	C C C2 —

C = Coton

C1 = Premier coton

C2 = Deuxième coton de la rotation

S = Sorgho

— = Jachère.

TABLEAU 2. — Sous-objets fertilisation du cotonnier (éléments en kg/ha).

Année	a_1					a_2					b_1					b_2				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	B ₂ O ₃	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	B ₂ O ₃	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	B ₂ O ₃	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	B ₂ O ₃
1963	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	—	—	66	—	60	—	—	66	—
1964	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	—	—	66	—	60	—	—	66	—
1965	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	—	—	66	—	60	—	—	66	—
1966	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	—	—	66	—	60	—	—	66	—
1967	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	—	—	66	—	60	—	—	66	—
1968	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	—	—	66	—	60	—	—	66	—
1969	—	—	—	—	—	23	29	—	12	—	23	29	—	12	—	80	—	—	10	—
1970	—	—	—	—	—	29	20	—	6	2	26	30	16	6	2	60	—	—	12	2
1971	—	—	—	—	—	19	19	—	6	2	23	15	12	6	2	60	—	—	12	2
1972	—	—	—	—	—	23	15	12	6	2	45	15	12	6	2	60	—	—	12	2
1973	—	—	—	—	—	22	18	14	6	2	44	18	14	6	2	60	—	—	12	2
1974	—	—	—	—	—	22	18	14	6	2	44	18	14	6	2	60	—	—	12	2
1975	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	—	—	12	2	60	—	—	12	2
1976	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	—	—	12	2	60	—	—	12	2
1977	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	—	—	12	2	60	—	—	12	2
1978	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	—	—	12	2	60	—	—	12	2

engrais ce qui permet de décrire l'évolution de la fertilité sans aucune intervention au cours des 16 années. Ces 77 situations correspondent à la 1^{re} colonne de chacune des 6 séries pour l'objet a_1 .

L'effet des rotations (jachère) et de la fertilisation peut être mis en évidence si l'on distingue des cycles de production. On observe que dans une même série les 4 rotations ABCD sont toutes cultivées en coton une année sur 6. Ces cycles de 6 ans sont soulignés d'un trait dans le tableau 1 ; il est possible de définir 3 sous-ensembles dont l'analyse de

la variance des rendements peut rendre compte de l'évolution de la fertilité au cours des divers cycles de production.

1° — 2 cycles de cultures :

 C_1 1^{re} année de culture dans les 6 séries C_2 6 années après dans les 6 séries

6 séries : S1, S2, S3, S4, S5, S6

4 rotations : A, B, C, D.

Ce sous-ensemble permet de comparer les 4 rotations sur les 6 séries après 1 cycle de culture.

2° — 3 cycles de cultures :

C_y1 1^{re} année de culture dans 4 sériesC_y2 6 années après dans 4 sériesC_y3 12 années après dans 4 séries

4 séries : S1, S2, S3, S4

4 rotations : A, B, C, D.

Ce sous-ensemble précise l'évolution des rendements suivant les rotations au cours de 3 cycles, mais seulement sur 4 séries.

3° — 4 séries : S1, S2, S3, S4 au cours du cycle de culture C_y3

4 rotations : A, B, C, D

2 fertilisations : a₁ et b₂. Ces deux sous-objets sont restés identiques à eux-mêmes depuis 1963.

Ce sous-ensemble permet de tester l'effet d'une fertilisation azotée, effet direct et arrière-effet cumulés et de son interaction avec les rotations.

* * *

b) Evolution de rendements en culture continue coton non fertilisée

A partir des 77 rendements obtenus sans jachère ni engrais, nous calculons 16 moyennes, rendements moyens suivant le nombre d'années de culture. Par exemple, le rendement moyen en 3^e année sera obtenu à partir des 6 rendements des années 1965 à 1972. Ces moyennes présentent l'avantage d'atténuer l'effet d'une année particulière.

L'évolution de ces moyennes représente celle de la fertilité du sol en culture continue non fertilisée.

TABLEAU 3. — Rendements moyens suivant la durée de culture.

Nombre d'années	Rendements coton-graine kg/ha	Nombre de séries participant à la moyenne
1	1 553	6
2	1 201	
3	1 200	
4	1 046	
5	1 168	
6	1 091	
7	963	
8	835	
9	869	
10	589	5
11	968	
12	740	4
13	885	
14	907	3
15	1 002	2
16	826	1

Le meilleur ajustement des rendements en fonction du nombre d'années de culture (N) est obtenu avec la variable $\frac{1}{N}$

Coefficient de corrélation avec N : $r = -0,71$ Coefficient de corrélation avec $\frac{1}{N}$: $r = 0,84$

$$\text{Rendement} = 824 + 878,5 \frac{1}{N}$$

Cette relation signifie que le rendement décroît rapidement après la mise en culture et qu'il tend à se stabiliser aux environs de 824 kg/ha (fig. 1).

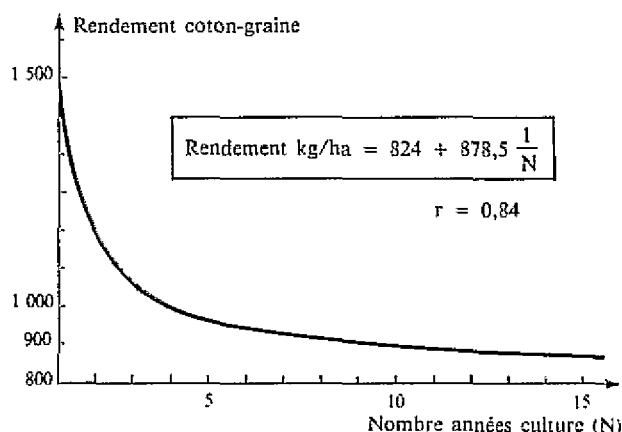


Fig. 1. — Evolution du rendement en coton-graine sans fertilisation ni jachère.

c) 2 cycles, 6 séries, 4 rotations

Rendements moyens

C_y1 = 1^{re} année dans les 6 séries = 1 933 kg/haC_y2 = 7^e année dans les 6 séries = 2 006 kg/ha

S1 = 1 862 kg/ha

S2 = 1 843 kg/ha

S3 = 1 369 kg/ha

S4 = 1 564 kg/ha

S5 = 2 908 kg/ha

S6 = 2 271 kg/ha

A = 1 609 kg/ha

B = 1 909 kg/ha

C = 2 167 kg/ha

D = 2 191 kg/ha

Analyse de la variance

Les blocs jouent dans cette expérimentation un rôle particulier ; dans chacune des séries ils sont affectés de numéros qui ne se correspondent que d'une façon arbitraire.

Les seules comparaisons ayant un sens, d'ailleurs accessibles puisque les blocs ne sont pris en considération que pour diminuer l'erreur expérimentale, sont celles qui, dans chaque série, portent sur les différences entre blocs de cette série et la moyenne générale de la série. Il n'y a donc pas lieu de séparer dans l'analyse de la variance celle des blocs et celles de toutes les interactions où ils interviennent (A. VESSEREAU).

C'est l'interaction rotation × cycle, très hautement significative, qui retient notre attention (tabl. 4 et 5).

TABLEAU 4. — Analyse de la variance, 2 cycles, 6 séries, 4 rotations.

Origine de la variation	°L	Variance	F calculé	Probabilité différ. significative
Cycle C	1	189 225	0.05	P = 0,34
Séries S	5	7 317 381	1.97	
Erreur (a) C × S	5	3 708 698		
Blocs B	66	107 456	69.11	P = 0,001
Rotations R	3	2 660 804	49.85	
Interaction R × C	3	1 919 341	7.43	
Interaction R × C	15	286 020	7.22	
Interaction R × C × S	15	277 868		
Erreur (b) R × C × S × B	30	38 501		

TABLEAU 5. — *Interaction cycle de culture × rotation.*

Rotation Cycle	A	B	C	D
C _y 1	1 813	2 027	1 964	1 929
C _y 2	1 408	1 793	2 371	2 453

Au départ de l'expérimentation, les 4 rotations sont évidemment identiques alors qu'après 6 années de culture les 4 rotations se distinguent très nettement. La présence d'un temps de jachère conduit à des rendements plus élevés.

d) 3 cycles, 4 séries, 4 rotations

Ce sous-ensemble correspond aux 4 premières colonnes du tableau 1.

C_y 1 = 1 559 kg/ha coton-graine
 C_y 2 = 1 759
 C_y 3 = 2 504
 S₁ = 2 035
 S₂ = 2 077
 S₃ = 1 679
 S₄ = 1 973
 A = 1 422
 B = 1 753
 C = 2 240
 A = 2 348

TABLEAU 6. — *Analyse de la variance.*

Origine de la variation	°L	Variance	F calculé	Probabilité différ. significative
Cycle C	2	11 916 983	4,45	P = 0,07
Séries S	3	1 164 031	0,43	
Erreur (a) C × S	6	2 678 625		
Blocs B	60	107 660		P = 0,001 P = 0,001 P = 0,003 P = 0,002
Rotations R	3	6 714 098	182,43	
Interaction R × C	6	2 642 261	71,79	
Interaction R × S	9	131 629	3,58	
Interaction R × C × S	18	111 180	3,02	
Erreur (b) R × C × S × B	36	36 804		

TABLEAU 7. — *Interaction rotation × cycle de cultures.*

Rotation Cycle	A	B	C	D
C _y 1	1 445	1 636	1 580	1 573
C _y 2	1 421	1 588	1 942	2 088
C _y 3	1 400	2 036	3 200	3 383

La supériorité des rotations C et D avec jachère notée dans l'analyse précédente, entre le 1^{er} et le 2^e cycle, se précise et s'accroît dans cette analyse avec le 3^e cycle (tabl. 6 et 7).

e) 4 séries, 4 rotations, 2 fertilisations sur coton du 3^e cycle

L'analyse permet de comparer au témoin absolu a₁ la

fertilisation b₂, 60 kg/ha d'azote sur coton depuis le début de l'expérimentation (tabl. 2).

S₁ = 2 268 kg/ha A = 1 280
 S₂ = 2 433 B = 1 954
 S₃ = 2 328 C = 3 160
 S₄ = 2 666 D = 3 302

a₁ = Témoin = 2 066 kg/ha

b₂ = 300 kg/ha de sulfate d'ammoniaque = 2 783 kg/ha

soit un accroissement de rendement de 12 kg de coton-graine par kg d'azote, ce qui est fréquemment observé à Bébedjia dans les courbes de réponse à l'azote.

TABLEAU 8. — *Analyse de la variance.*

Origine de la variation	°L	Variance	F calculé	Probabilité différ. significative
Séries S	3	739 012	2,74	Ht. signif.
Bloc	14	382 667		
Rotation R	3	22 729 149	84,26	
R × S	9	209 158	0,78	
Erreur	18	269 735		
Fertilisation F	1	13 326 667	45,50	Ht. signif.
F × S	3	483 720	1,65	
F × R	3	56 653	0,19	
F × S × R	9	190 271	0,65	
Erreur	32	292 892		

Nous retrouvons bien sûr l'effet rotation (tabl. 8) ; l'effet fertilisation est lui aussi hautement significatif mais sans aucune interaction avec les rotations. Les effets rotation et fertilisation s'ajoutent simplement donnant les moyennes extrêmes suivantes :

- Sans jachère et sans fertilisation = 885 kg/ha coton-graine.
- Avec 2 années de jachère et 60 kg/ha d'azote sur coton = 3 563 kg/ha coton-graine.
- Avec 4 années de jachère et 60 kg/ha d'azote sur coton = 3 632 kg/ha coton-graine.

f) Observations générales sur l'évolution des rendements

Les analyses statistiques précédentes, mêmes réduites à l'essentiel, peuvent paraître encombrantes pour le lecteur ; elles sont cependant nécessaires pour guider et étayer les interprétations d'un ensemble de données particulièrement complexe. On ne peut écarter ces analyses sans tomber dans l'imprécision et risquer des interprétations subjectives.

De fortes différences de rendement sont apparues dans l'essai X après 16 années d'exploitation suivant la présence ou non d'une jachère et suivant la fertilisation. On a pu mettre en évidence une dégradation rapide de la fertilité en l'absence de toute intervention sur une culture de coton continue et, à l'opposé, un effet améliorant de la jachère naturelle pratiquée durant 2 ans.

On met souvent en doute les possibilités d'introduire une jachère dans les systèmes de production en raison de l'occupation croissante des terres cultivables. La jachère de 2 ans n'est cependant pas incompatible avec une sédentarisation des exploitations ; il ne faut pas la comparer aux jachères de longue durée des systèmes itinérants. Nous examinerons dans la 3^e partie de cette étude, consacrée aux systèmes de cultures, le mode de conduite des jachères de courte durée.

Nous devons maintenant tenter d'expliquer l'évolution de la fertilité provoquée dans l'essai X par une modification des caractéristiques pédologiques.

5. Analyse du sol. Evolution

a) Situation générale au mois d'août 1978

Au mois d'août 1978, un prélèvement général a été effectué dans l'horizon (0-20) sur toutes les parcelles élémentaires quelle qu'ait été la culture de l'année. Les valeurs annoncées dans le tableau 9 sont donc la moyenne de 72 analyses, ces moyennes ont été calculées par rotation A B C D et par sous-parcelle fertilisation a_1 a_2 b_1 b_2 (tabl. 1 et 2).

D'une manière générale, on observe (tabl.9) que l'essai X est implanté sur un sol riche ayant encore une teneur en matière organique supérieure en moyenne à 1,4 % ; le complexe absorbant est bien saturé et le pH proche de la neutralité.

La situation n'est cependant pas uniforme et l'on observe dans le tableau 9 des variations dans les teneurs en matière organique, potassium et magnésium échangeables

sous l'effet des traitements rotation et fertilisation. Seule une analyse statistique nous indiquera si les différences observées peuvent être attribuées à ces traitements.

Le tableau 10 résume cette analyse statistique où l'on observe effectivement une action très probable des rotations sur les 3 critères pédologiques retenus (horizon 0-20 cm).

La présence d'un temps de jachère dans les rotations C et D conduit à des teneurs supérieures en matière organique, en potassium et magnésium échangeables (tabl. 11).

Quant à la fertilisation, le sous-traitement b_2 qui a toujours reçu du sulfate d'ammoniaque a sans doute subi une faible désaturation avec perte de potassium, mais les différences sont très réduites ; elles ne sont sensibles à l'analyse statistique qu'en raison du grand nombre de répétitions des sous-traitements a_1 , a_2 , b_1 et b_2 ; l'erreur intervient en effet avec 90 degrés de liberté.

TABLEAU 9. — Analyse du sol de l'essai X, août 1978 (0-20 cm).

Août 1978 Essai X 0-20 rotation	Matière organique				K total ‰	P total ppm	P Olsen ppm	Complexe absorbant meq/100 g						pH eau
	M.O %	C %	N ‰	C/N				Ca	Mg	K	Na	Somme	CEC	
A	1,29	0,75	0,50	15	1,54	465	111	5,14	0,73	0,20	0,01	6,09	5,66	6,90
B	1,40	0,81	0,53	15	1,57	496	120	5,55	0,80	0,22	0,02	6,60	5,93	6,92
C	1,55	0,90	0,58	15	1,58	464	113	5,64	0,82	0,24	0,01	6,71	6,11	6,80
D	1,69	0,98	0,66	15	1,58	499	117	6,04	0,91	0,26	0,02	7,22	6,48	6,84
a_1	1,46	0,85	0,57	15	1,56	451	108	5,54	0,78	0,23	0,01	6,55	5,96	6,90
a_2	1,54	0,89	0,58	15	1,57	496	120	5,92	0,85	0,24	0,01	7,04	6,22	6,92
b_1	1,47	0,85	0,56	15	1,59	509	123	5,59	0,82	0,24	0,01	6,67	6,10	6,84
b_2	1,48	0,86	0,57	15	1,54	467	111	5,36	0,77	0,21	0,01	6,35	5,88	6,82

TABLEAU 10.

Origine de la variation	Degré de liberté	F Matière org.	F Potassium éch.	F Magnésium éch.
Série S	5	2,39	3,27	4,19
Bloc B	2	0,73	0,78	0,52
S × B (erreur a)	10			
Rotation R	3	13,23*	4,89*	4,77*
R × S	15	1,40	1,76	2,12
R × B	6	0,81	0,65	0,49
R × S × B (erreur b)	30			
Fertilisation F	3	1,94	4,55*	2,29
F × S	15	1,54	2,22*	1,25
F × B	6	7,90*	8,32*	5,77
F × R	9	0,28	0,78	0,32
F × S × B	30	1,86	1,51	1,71
F × S × R	45	1,10	0,73	0,67
F × B × R	18	1,03	0,43	0,57
F × B × R × S (erreur c)	90			

* Niveau de probabilité $P = 0,01$.

TABLEAU 11. — Classement au niveau de probabilité $P = 0,01$.

Rotation	Mat. org. %	Potassium meq/100 g	Magnésium meq/100 g
A	1,29 C	0,20 C	0,73 B
B	1,40 C	0,22 BC	0,80 B
C	1,55 B	0,24 AB	0,82 AB
D	1,69 A	0,26 A	0,91 A
Fertilisation			
a_1		0,23 ab	
a_2		0,24 a	
b_1		0,24 a	
b_2		0,21 b	

TABLEAU 12. — Evolution de la matière organique entre 1967 et 1978.
Taux de décomposition.

Rotation	% matière organique Moyenne 4 séries = S1, S2, S3, S4 (0-20 cm)		Taux de décomposition entre 1967 et 1978 $\frac{(1) - (2)}{(1)} \times 100$	Nbre années cult. entre 1967 et 1978 (tableau n° 2 - Moy. 4 séries)	Taux moyen de décomposition par année de culture
	Mars 1967 (1)	Août 1978 (2)			
A	1,76	1,30	26 %	11 années	2,4 %
B	1,92	1,48	23 %	11 années	2,1 %
C	1,83	1,61	12 %	7 années	1,7 %
D	1,96	1,86	5 %	3,25 années	1,5 %

b) Evolution de la matière organique. Taux de décomposition

En 1978, la fertilité du sol des rotations avec jachère apparaît à l'analyse supérieure à celle des autres rotations en culture continue mais s'agit-il d'une amélioration de la fertilité initiale ou d'une moindre dégradation ?

Des prélèvements de terre réalisés sur les séries S1, S2, S3 et S4 en mars 1967 et août 1978, soit à 11 ans d'intervalle, ont été analysés ensemble en 1980.

Dans le tableau 12 nous observons l'évolution de la matière organique. Avec les rotations A et B en culture continue, le taux annuel moyen de décomposition est estimé à 2,4 % et 2,1 %. Ces valeurs sont très vraisemblables, nous savons en effet que ce taux est fonction de l'aridité du climat ; or au Mali et en Haute-Volta, nous obtenons des taux de 4 à 5 % et en Côte-d'Ivoire de 1 % ; avec 2,4 % Bébédjia se situe bien entre ces valeurs extrêmes. Avec les rotations C et D qui ont eu des périodes de jachère (tabl. 1), les pertes de matière organique sont nettement moindres. Dans la dernière colonne du tableau 12 nous avons présenté le taux moyen de décomposition par année de culture ; nous observons des différences certaines

entre A B C et D qui ne peuvent s'expliquer que par un effet améliorant de la jachère, insuffisant cependant pour corriger les pertes des années de culture.

6. Liaison entre les rendements observés et l'analyse du sol en 1978

Nous venons de mettre en évidence l'effet de la jachère et de la fertilisation d'une part sur la production du cotonnier et d'autre part sur les teneurs du sol en matière organique, en potassium et magnésium échangeables. Il est maintenant nécessaire de vérifier les relations entre rendement et composition du sol pour établir les relations de cause à effet et montrer l'incidence de la fertilité du sol sur la production.

Une corrélation multiple a été calculée en 1978 (tabl. 13 et 14) entre les rendements des 39 parcelles a_1 (témoin n'ayant pas reçu d'engrais) et les teneurs du sol dans l'horizon 0-20 cm. La variabilité des rendements de ces 39 parcelles est d'ailleurs très élevée, ils varient de 98 à 3 331 kg/ha de coton-graine (fig. 2). Nous avons déjà noté page 4-c la très forte différence de rendement moyen observée en 1978 entre sans jachère - sans fertilisation = 885 kg/ha et avec jachère et fertilisation = 3 632 kg/ha.

TABLEAU 13. — Rendements. Composition du sol
(horizon 0-20 cm), 1978.

Réf. tableau 1 3 rép.	Rend. cot. gr. kg/ha — Y —	Mat. org. % — X1 —	K éch. meq/ 100 g — X2 —	Mg éch. meq/ 100 g — X3 —	Réf. tableau 1 3 rép.	Rend. cot. gr. kg/ha — Y —	Mat. org. % — X1 —	K éch. meq/ 100 g — X2 —	Mg éch. meq/ 100 g — X3 —
S1 A	1 167 133 1 179	1,55 1,22 0,95	0,21 0,11 0,24	1,15 0,46 0,82	S4 C	2 462 3 210 3 062	1,76 1,48 1,76	0,31 0,23 0,39	1,09 0,76 1,31
S2 A	408 1 745 1 157	0,90 1,59 1,26	0,18 0,37 0,28	0,78 1,23 0,76	S4 D	2 016 3 425 2 996	1,79 1,88 2,07	0,26 0,30 0,41	1,00 0,88 1,18
S2 B	669 1 716 2 826	1,17 1,50 1,84	0,18 0,19 0,30	0,73 0,80 1,18	S5 A	566 1 985 278	1,03 1,31 1,17	0,14 0,27 0,16	0,62 0,82 0,54
S2 C	1 465 3 092 2 432	1,33 1,41 1,64	0,18 0,25 0,21	0,69 0,71 0,88	S6 A	928 98 2 393	1,24 0,93 1,78	0,19 0,10 0,27	0,81 0,40 1,09
S3 A	473 216 1 302	1,16 0,93 1,19	0,14 0,11 0,20	0,71 0,39 0,66	S6 B	2 708 790 2 863	1,34 1,10 2,48	0,21 0,17 0,33	0,81 0,75 1,05
S4 A	709 662 1 428	1,41 0,98 1,81	0,22 0,17 0,26	1,10 0,88 0,99	S6 C	3 003 1 164 3 331	1,53 1,26 2,71	0,28 0,14 0,14	0,94 0,59 1,32
S4 B	1 654 1 825 1 810	1,40 1,41 1,24	0,30 0,22 0,21	1,09 0,90 0,76					

Y = Variable dépendante

X1, X2 et X3 = variables explicatives.

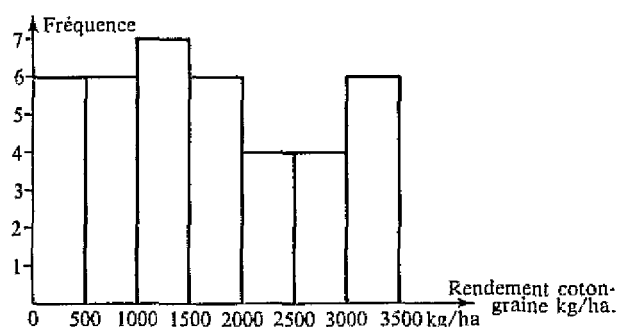


Fig. 2. — Rendements coton-graine des 39 parcelles témoin, 1978.

TABLEAU 14. — Matrice de corrélation.

	Y	X ₁	X ₂	X ₃
Y	1	0.76	0.67	0.64
X ₁		1	0.55	0.76
X ₂			1	0.74
X ₃				1

Régression multiple.

$$b_1 = 1\,710 \quad b_2 = 6\,339 \quad b_3 = -951$$

$$t_{b_1} = 4,56 \quad t_{b_2} = 3,28 \quad t_{b_3} = -1,22$$

Le coefficient b_3 ne diffère pas de zéro au niveau de probabilité $P = 0,05$, il faudrait que t_{b_3} soit au moins égal à 2,042 pour 35° de liberté. Nous pouvons donc ne pas tenir compte du magnésium et calculer une nouvelle régression avec uniquement X_1 matière organique et X_2 potassium échangeable.

$$\text{Rendement kg/ha} = -1\,497 + 1\,423 \text{ Matière organique \%} + 4\,920 \text{ K éch. meq/100 g}$$

$t_{b_1} = 4,85 \quad t_{b_2} = 3,17 \quad R = 0,82$ avec 36° de liberté avec $R = 0,82$ et $R^2 = 0,67$ les deux variables expliquent 67 % de la variabilité observée.

Il y a donc une liaison très forte entre le rendement du cotonnier et la fertilité du sol définie par ses teneurs en matière organique et en potassium échangeable dans l'horizon 0-20 cm.

7. Conclusion

La dégradation de la fertilité est rapide si l'on ne prend pas des mesures conservatrices ; elle se manifeste par une chute de la production et par une évolution du sol sensible à l'analyse.

Il se vérifie à Bébedjia qu'en région soudanienne sous une pluviométrie de 1 100 mm c'est la matière organique du sol qui représente le critère le plus sûr de la fertilité et de son évolution. Le pH et le taux de saturation du complexe absorbant ne sont pas modifiés par 10 années d'exploitation.

En 1978, il y a une liaison étroite entre le rendement du cotonnier non fertilisé et la richesse organique du sol ; la jachère naturelle joue un rôle positif dans son entretien, mais elle n'a pas permis de maintenir sa teneur au niveau d'origine. Le potassium échangeable explique également une partie de la variabilité des rendements ; la correction de sa déficience est cependant aisée par des apports d'engrais.

II. ANALYSE RÉGIONALE DE LA FERTILITÉ

1. Analyse des sols de la zone cotonnière

a) Cadre de l'étude

En 1981 et 1982, plusieurs formules d'engrais ont été mises régionalement en comparaison par la méthode des blocs dispersés.

1981	1982
— P1 = 100 kg 19.12.19	— P0 = Témoin non fertilisé
— P2 = 200 kg 19.12.19	— P1 = idem. 1981
+ 50 kg/ha urée fin juillet	— P2 = idem. 1981
— P3 = 150 kg 19.12.19	
+ 100 kg/ha urée fin juillet	
	— P4 = 150 kg/ha 19.12.19 + 50 kg/ha urée.

Les tests sont réalisés par les cultivateurs eux-mêmes (tabl. 15). Après la germination, dans les cultures paysannes les meilleures par leur date de semis et leur densité de plantation, on délimite des parcelles de 250 m² recevant chacune l'une des 3 ou 4 formules d'engrais. Deux échantillons de terre, 0-20 et 20-40 cm, sont prélevés par emplacement avant l'application des engrais.

Ce réseau régional, outre son intérêt pratique pour la définition d'une formule d'engrais vulgarisable, permet par les analyses du sol une description agro-pédologique régionale ainsi qu'une explication de la variabilité des rendements observés. Celle-ci est très élevée, les rendements parcellaires P1 observés variant de 301 à 3 556 kg/ha.

TABLEAU 15. — Localisation. Rendements coton-graine (voir carte).

Préfecture	1981					1982					
	Nbre localités		P1	P2	P3	Nbre localités		P0	P1	P2	P4
	Sol anal.	récolt.				Sol anal.	récolt.				
Mayo-Kebbi	10	9	2 217	2 560	2 669	13	8	—	1 650	1 960	1 817
Tandjilé	10	9	1 621	2 196	2 325	—	—	—	—	—	—
Logone Occid.	15	12	1 202	1 571	1 424	9	9	1 027	1 376	1 902	1 759
Logone Orient.	10	6	1 094	1 472	1 453	10	9	1 372	1 573	1 836	1 756
Moyen-Chari	15	12	2 213	2 831	3 018	10	9	1 090	1 277	1 726	1 633
	Moyenne Rendement		1 710	2 176	2 228	Moyenne sans Mayo-Kebbi		1 163	1 409	1 821	1 716
						Moyenne avec Mayo-Kebbi			1 463	1 853	1 739

b) Données analytiques Tableaux 16 à 19.

TABLEAU 16. — Moyenne par préfecture 1981.
Horizon 0-20 cm. 8 prélèvements pour 750 m². Gerdar-Montpellier.

	Mayo-Kebbi	Tandjilé	Logone Occid.	Logone Orient.	Moyen-Charî
K total ‰	4,36	0,75	0,65	0,76	0,47
Argile %	7,05	2,93	4,42	6,66	12,82
Limon %	7,21	5,36	3,73	1,05	2,37
Sable très fin %	6,64	5,30	4,29	2,13	4,05
Sable fin %	32,24	34,63	24,17	27,88	24,64
Sable grossier %	48,86	51,74	63,41	62,26	56,09
Mat. org. totale %	0,94	0,76	0,71	0,57	1,12
C total %	0,55	0,44	0,42	0,34	0,65
N total ‰	0,66	0,47	0,49	0,44	0,60
C/N	8,3	9,4	8,6	7,7	10,8
P total ppm	148	95	157	198	335
P Olsen ppm	17	14	52	59	100
Ca éch. meq/100 g	3,25	1,96	2,54	2,02	4,72
Mg éch. meq/100 g	0,77	0,50	0,40	0,30	0,73
K éch. meq/100 g	0,20	0,15	0,09	0,12	0,18
Na éch. meq/100 g	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01
Somme bases éch. meq/100 g	4,25	2,62	3,05	2,46	5,65
CEC éch. meq/100 g	3,97	1,93	2,19	2,38	4,45
V %	—	—	—	—	—
pH eau	6,68	6,22	6,09	6,33	6,84
pH KCl	5,76	5,60	5,39	5,39	6,10
Nombre emplacements	10	10	15	10	15

TABLEAU 17. — Moyenne par préfecture 1981.
Horizon 20-40 cm.

	Mayo-Kebbi	Tandjilé	Logone Occid.	Logone Orient.	Moyen-Charî
K total ‰	4,54	0,79	0,65	0,75	0,45
Argile %	11,04	5,23	6,71	8,78	21,01
Limon %	8,60	5,94	3,81	1,03	2,30
Sable très fin %	6,08	5,03	4,41	2,08	3,69
Sable fin %	32,91	34,68	23,25	26,99	20,65
Sable grossier %	41,35	49,12	61,89	61,09	52,35
Mat. org. totale %	0,72	0,48	0,54	0,49	0,74
C total %	0,42	0,28	0,32	0,29	0,43
N total ‰	0,52	0,34	0,42	0,39	0,48
C/N	8,1	9,0	7,6	7,4	9,0
P total ppm	134	82	120	192	277
P Olsen ppm	13	8	32	53	73
Ca éch. meq/100 g	2,40	0,84	1,70	1,56	3,45
Mg éch. meq/100 g	0,64	0,35	0,32	0,26	0,61
K éch. meq/100 g	0,11	0,07	0,06	0,09	0,13
Na éch. meq/100 g	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01
Somme bases éch. meq/100 g	3,18	1,27	2,10	1,92	4,20
CEC éch. meq/100 g	3,62	1,31	1,79	2,23	3,85
V %	87,8	96,9	—	86,1	—
pH eau	6,34	6,01	5,93	6,19	6,63
pH KCl	5,40	5,12	5,23	5,24	5,84
Nombre emplacements	10	10	15	10	15

TCHAD

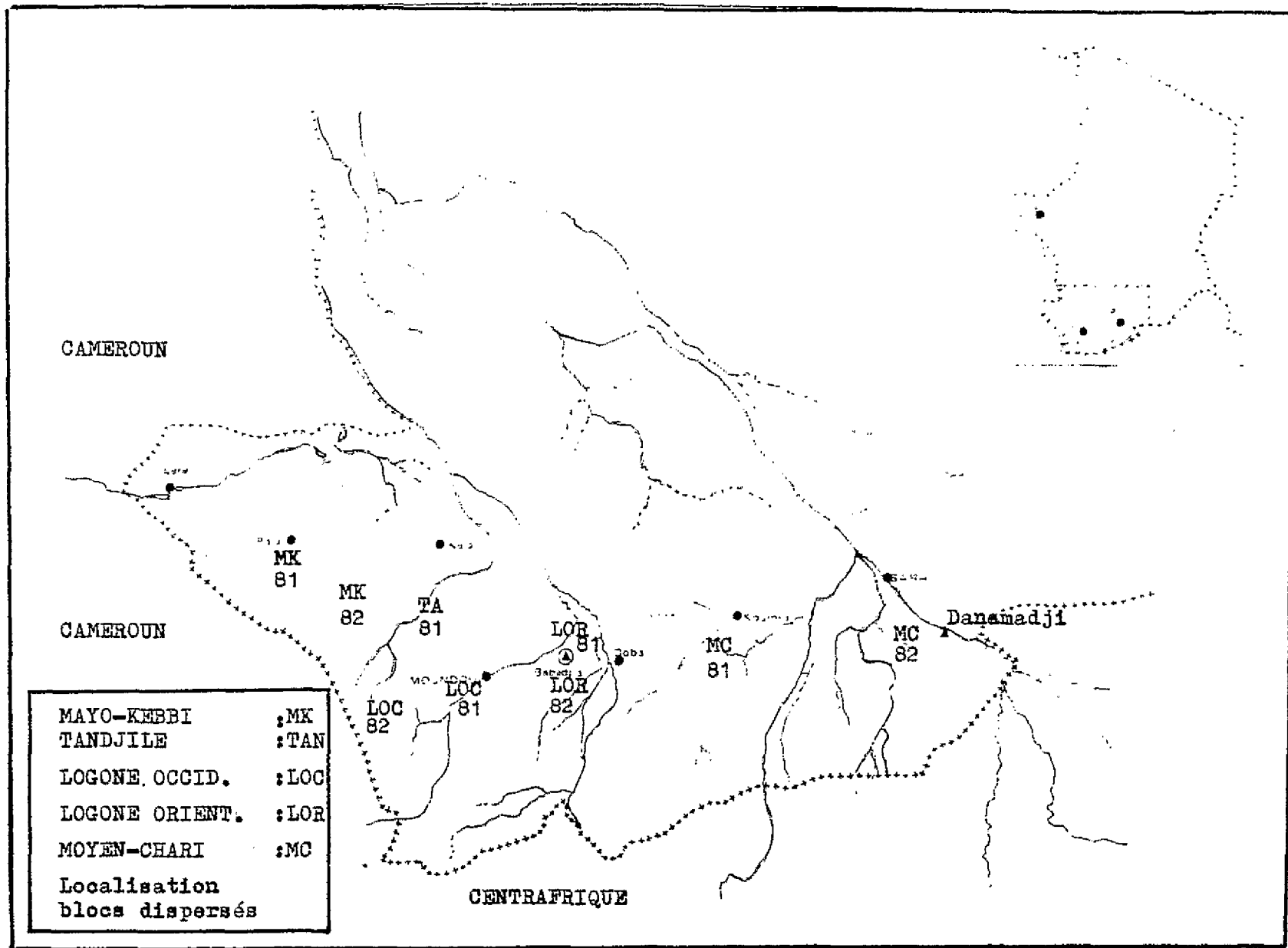


TABLEAU 18. — Moyenne par préfecture 1982.
Horizon 0-20 cm.

	Mayo-Kebbi	Tandjilé	Logone Occid.	Logone Orient.	Moyen-Chari
K total ‰	2,52		3,22	1,10	0,90
Argils %	5,1		5,1	8,9	4,5
Limon %	5,2		3,3	3,9	3,7
Sable très fin %	10,0		4,6	4,6	7,4
Sable fin %	45,7		29,1	21,8	37,5
Sable grossier %	33,9		57,9	60,8	46,9
Mat. org. totale %	0,70		0,86	1,16	0,70
C total %	0,41		0,50	0,67	0,41
N total ‰	0,34		0,37	0,47	0,35
C/N	12		14	14	12
P total ppm	99		110	232	97
P Olsen ppm	28		20	15	20
Ca éch. meq/100 g	1,86		1,79	3,37	1,31
Mg éch. meq/100 g	0,54		0,47	0,66	0,40
K éch. meq/100 g	0,13		0,16	0,17	0,12
Na éch. meq/100 g	0,04		0,04	0,02	0,03
Somme bases éch. meq/100 g	2,57		2,46	4,22	1,86
CEC éch. meq/100 g	2,84		2,67	4,77	2,31
V %	90,5		92	88	81
pH eau	6,60		7,10	7,15	6,75
pH KCl	5,75		6,15	6,20	5,85
Nombre emplacements	13		9	10	10

TABLEAU 19. — Moyenne par préfecture 1982.
Horizon 20-40 cm.

	Mayo-Kebbi	Tandjilé	Logone Occid.	Logone Orient.	Moyen-Chari
K total ‰	2,63		3,06	1,10	0,97
Argile %	8,7		8,7	14,4	9,8
Limon %	5,4		3,6	3,7	3,4
Sable très fin %	9,7		4,1	4,8	7,2
Sable fin %	43,4		27,6	20,5	36,1
Sable grossier %	32,8		56,0	56,6	43,7
Mat. org. totale %	0,52		0,48	0,66	0,41
C total %	0,30		0,28	0,38	0,24
N total ‰	0,26		0,28	0,33	0,22
C/N	12		10	12	11
P total ppm	91		86	172	75
P Olsen ppm	19		14	11	14
Ca éch. meq/100 g	1,36		0,99	1,87	1,15
Mg éch. meq/100 g	0,56		0,37	0,43	0,34
K éch. meq/100 g	0,10		0,12	0,11	0,10
Na éch. meq/100 g	0,03		0,04	0,01	0,03
Somme bases éch. meq/100 g	2,05		1,52	2,42	1,62
CEC éch. meq/100 g	2,49		1,92	3,46	1,93
V %	82		79	70	84
pH eau	6,40		6,80	6,75	6,55
pH KCl	5,50		5,55	5,60	5,40
Nombre emplacements	13		9	10	10

c) *Interprétation des données analytiques en composantes principales**Principe de l'interprétation (P. DAGNELIE)*

Chaque analyse comporte 21 mesures concernant la granulométrie, la matière organique, le complexe absorbant et les éléments totaux ; ces variables sont plus ou moins interdépendantes. Leur ensemble est évidemment à première vue très confus : les moyennes établies par département dans les tableaux 16, 17, 18 et 19 donnent déjà une première impression synthétique mais il paraît beaucoup plus instructif de faire appel à l'analyse en composantes principales pour décrire les relations entre les diverses variables et tenter de caractériser chaque milieu par des variables limitées en nombre.

Selon P. DAGNELIE « l'analyse des composantes intervient dans l'interprétation des relations existant entre une série de variables interdépendantes. Son but principal est de condenser l'essentiel des informations données par ces variables interdépendantes, observées directement, en un nombre plus restreint de variables fondamentales indépendantes, qu'on ne peut observer directement ». Le premier objectif de l'analyse des composantes est bien de remplacer les variables initiales, généralement corrélées par des variables non corrélées. Le second objectif est de réduire autant que possible le nombre de variables à prendre en considération, c'est-à-dire le nombre de dimensions de l'espace dans lesquelles les variations doivent être étudiées.

Avant de présenter l'analyse des composantes des sols étudiés, nous donnerons quelques précisions sur la signifi-

cation de celles-ci et sur les critères retenus dans leur choix pour se limiter aux composantes les plus représentatives du milieu.

« L'analyse d'une série de valeurs observées ($X\alpha$, $Y\alpha$) relatives à deux variables interdépendantes, peut se faire en ajustant au diagramme de dispersion une droite qui assure le minimum de la somme des produits des écarts $|X\alpha - \bar{X}|$ et $|Y\alpha - \bar{Y}|$ mesurés parallèlement aux deux axes de coordonnées. Cette droite se confond avec celle du grand axe des ellipses d'égale densité de probabilité. La direction perpendiculaire, qui assure le minimum de variance des valeurs réduites, peut être considérée comme le deuxième axe principal du diagramme de dispersion ; cette direction se confond avec celle du petit axe des ellipses d'égale densité de probabilité » (P. DAGNELIE).

Cette recherche des deux axes directeurs d'une série de valeurs observées à deux variables interdépendantes peut être envisagée pour les 3 axes directeurs d'une série à 3 variables interdépendantes : ce sont les 3 axes d'une ellipsoïde et pour p axes d'une série à p variables interdépendantes.

On démontre que les variances correspondant aux axes principaux ainsi définis sont en fait les valeurs propres de la matrice de corrélation. Le choix des axes directeurs les plus représentatifs d'un ensemble de variables interdépendantes se fera à partir de ces valeurs propres. Si nous revenons au cas le plus simple de deux variables, le diagramme représentatif peut être une ellipse plus ou moins allongée et se réduire même à une simple droite si le coefficient de corrélation entre les deux variables est égal à 1 ; dans ce cas, une des valeurs propres sera égale à 2 et l'autre sera nulle. Un seul axe directeur sera suffisant pour caractériser

l'ensemble des données si l'un des deux a une variance élevée (valeur propre) par rapport à l'autre.

Dans le cas de 3 variables, on peut se limiter à un axe si le diagramme est proche d'une droite ou à 2 axes si les valeurs sont proches d'un plan.

L'examen des valeurs propres (variance des nouvelles variables) de la matrice de corrélation des variables observées permet de retenir les composantes, en nombre limité, caractéristiques d'un milieu.

Choix des variables

Il nous paraît conforme aux buts de cette étude de rechercher des axes directeurs suivant certains aspects agro-nomiques des analyses de sol : c'est ainsi que nous distinguons deux groupes de variables, l'un caractérisant la nutrition des végétaux (eau et NSPK) et l'autre le complexe absorbant du sol.

1^{er} groupe :

x_1 = argile + limon
 x_2 = mat. org.
 x_3 = phosphore total
 x_4 = potassium éch. } = alimentation hydrique
 } = alimentation minérale NSPK

2^e groupe :

x_1 = Ca échangeable
 x_2 = Mg échangeable
 x_3 = K échangeable
 x_4 = capacité d'éch. } = complexe absorbant

La recherche des axes directeurs a été faite avec les données de l'horizon 0-40 cm plus représentatif de la fertilité qu'un horizon limité aux 20 premiers centimètres, ceci vraisemblablement en raison de l'enracinement pivotant du cotonnier.

Mayo-Kebbi

1^{er} groupe = argile + limon, matière organique, P total, potassium échangeable (tabl. 20).

TABLEAU 20.

Composante princ. axe dir.	Valeur propre (var.)	% var. tot.	Coefficients directeurs				Corrélation r (\bar{x} , z)			
z_1	2,40	60,1	0,425	0,559	0,564	0,4347	0,66	0,87	0,87	0,67
z_2	0,79	19,8	0,587	-0,435	-0,424	0,535	0,52	-0,39	-0,38	0,47
z_3	0,65	16,3	-0,663	-0,212	0,174	0,696	-0,53	-0,17	0,14	0,56
z_4	0,15	3,8	-0,181	0,676	-0,687	0,198	-0,07	0,27	-0,27	0,08

Les deux variables synthétiques (axes directeurs) Z_1 et Z_2 sont suffisantes pour caractériser les sols du Mayo-Kebbi vis-à-vis des 4 variables choisies ; Z_1 et Z_2 regroupent 80 %

de la variance totale, Z_1 représente surtout la matière organique et le phosphore total liés positivement, Z_2 montre une opposition entre texture et matière organique.

$$\begin{aligned} Z_1 &= 0,08 A + L + 2,07 MO + 0,01 P \text{ total} + 9,45 K \text{ éch.} \\ Z_2 &= 0,12 A + L - 1,61 MO - 0,01 P \text{ total} + 11,6 K \text{ éch.} \end{aligned}$$

2^e groupe Ca échangeable, Mg échangeable, K échangeable, capacité d'échange (tabl. 21).

TABLEAU 21.

Composante princ. axes dir.	Valeur propre (var.)	% var. tot.	Coefficients directeurs				Corrélation r (\bar{x} , z)			
z_1	3,02	75,4	0,551	0,551	0,289	0,556	0,96	0,96	0,50	0,97
z_2	0,83	20,7	0,176	0,067	-0,949	0,251	0,16	0,06	-0,86	0,23
z_3	0,13	3,2	0,607	-0,780	0,090	0,124	0,22	-0,28	0,03	0,04
z_4	0,03	0,7	-0,542	-0,292	0,082	0,784	-0,09	-0,05	0,01	0,13

Deux axes directeurs regroupent 96 % de la variance totale, les coefficients de corrélation montrent une grande indépendance du potassium vis-à-vis des autres composan-

tes du complexe absorbant. Z2 est essentiellement un axe potassium échangeable.

$$\begin{aligned} Z1 &= 0,38 \text{ Ca} + 2,11 \text{ Mg} + 6,32 \text{ K} + 0,33 \text{ CEC} \\ Z2 &= 0,12 \text{ Ca} + 0,26 \text{ Mg} - 20,77 \text{ K} + 0,15 \text{ CEC} \end{aligned}$$

Tandjilé

Les données sont insuffisantes pour rechercher des axes directeurs caractérisant les sols cultivés en coton de cette préfecture.

Logone oriental et Logone occidentale

La grande similitude des sols de ces deux préfectures nous ont conduit à regrouper les 44 situations analysées dans un même ensemble.

1^{er} groupe = argile + limon, matière organique, P total, K éch. (tabl. 22).

TABLEAU 22.

Composante princ. axes dir.	Valeur propre (var.)	% var. tot.	Coefficients directeurs				Corrélation r (x, z)			
Z1	2,15	53,8	0,357	0,610	0,485	0,514	0,53	0,90	0,71	0,75
Z2	0,96	24,0	-0,830	-0,027	0,551	0,078	-0,81	-0,03	0,84	0,08
Z3	0,60	14,9	-0,236	-0,227	-0,431	0,841	-0,18	-0,18	-0,33	0,65
Z4	0,29	7,2	0,374	-0,758	0,510	0,158	0,20	-0,41	0,27	0,08

Les deux premiers axes regroupent 78 % de la variance ; sur le premier axe, la texture est assez peu représentée,

$r = 0,53$; par contre, le second axe lui est essentiellement consacré.

$$\begin{aligned} Z1 &= 0,08 \text{ A+L} + 3,45 \text{ MO} + 0,007 \text{ P total} + 10,28 \text{ K éch.} \\ Z2 &= -0,194 \text{ A+L} - 0,153 \text{ MO} + 0,008 \text{ P total} + 1,560 \text{ K éch.} \end{aligned}$$

2^e groupe = Ca, Mg, K, capacité d'échange (tabl. 23).

TABLEAU 23.

Composante princ. axes dir.	Valeur propre (var.)	% var. tot.	Coefficients directeurs				Corrélation r (x, z)			
Z1	2,89	73,3	0,457	0,547	0,439	0,546	0,78	0,93	0,75	0,93
Z2	0,65	16,3	0,648	-0,017	-0,757	0,078	0,52	-0,01	-0,61	0,08
Z3	0,31	7,7	-0,595	0,436	-0,495	0,459	-0,33	0,24	-0,28	0,26
Z4	0,15	3,7	-0,023	-0,713	0,044	0,699	-0,01	-0,27	0,02	0,27

Une seule composante Z1 serait presque suffisante pour décrire le complexe absorbant des deux Logone ; on retrouve comme au Mayo-Kebbi une certaine indépen-

dance du potassium qui se retrouve en opposition avec le calcium sur Z2.

$$\begin{aligned} Z1 &= 0,25 \text{ Ca} + 3,33 \text{ Mg} + 9,00 \text{ K} + 0,43 \text{ CEC} \\ Z2 &= 0,36 \text{ Ca} - 0,11 \text{ Mg} - 15,52 \text{ K} + 0,06 \text{ CEC} \end{aligned}$$

Moyen-Chari

1^{er} groupe = argile + limon, matière organique, P total, K échangeable (tabl. 24).

TABLEAU 24.

Composante princ. axes dir.	Valeur propre (var.)	% var. tot.	Coefficients directeurs				Corrélation r (x, z)			
Z1	3,19	79,7	0,479	0,542	0,542	0,428	0,86	0,97	0,97	0,76
Z2	0,60	15,1	-0,573	-0,147	0,019	0,806	-0,45	-0,11	0,01	0,63
Z3	0,16	4,0	0,652	-0,331	-0,516	0,405	0,26	-0,15	-0,20	0,16
Z4	0,05	1,3	-0,160	0,760	-0,630	0,009	-0,04	0,17	-0,14	0,00

Avec près de 80 % de la variance totale, l'axe Z1 représente bien les sols du Moyen-Chari analysés en 1981 et 1982 ; les 4 variables sont donc liées entre elles positive-

ment. On remarquera cependant à nouveau une indépendance du potassium qui s'oppose à la texture sur le deuxième axe Z2.

$$Z1 = 0,07 A + L + 1,78 MO + 0,003 P \text{ total} + 4,36 K$$

2^e groupe = Ca, Mg, K et capacité d'échange (tabl. 25).

TABLEAU 25.

Composante princ. axes dir.	Valeur propre (var.)	% var. tot.	Coefficients directeurs				Corrélation r (x, z)			
Z1	3,31	82,7	0,484	0,534	0,497	0,483	0,88	0,97	0,90	0,88
Z2	0,35	8,7	0,486	-0,236	-0,689	0,483	0,29	-0,14	-0,41	0,28
Z3	0,29	7,2	-0,709	-0,010	0,014	0,705	-0,38	-0,01	0,01	0,38
Z4	0,06	1,4	0,193	-0,810	0,532	0,152	0,00	-0,19	0,13	0,00

Le complexe absorbant est bien représenté par l'axe Z1 qui regroupe 82,7 % de la variance totale ; toutes les variables sont positivement et fortement corrélées entre elles.

$$Z1 = 0,21 Ca + 0,62 Mg + 5,05 K + 0,31 CEC$$

d) Conclusion

Les analyses de sol associées au réseau régional d'expérimentation en blocs dispersés ont permis une description agronomique des sols de la zone cotonnière. Cette description s'améliorera au cours des années si l'on peut poursuivre l'étude commencée en 1981 par le choix annuel d'un canton particulier dans chacune des 5 préfectures.

L'analyse en composantes principales réduit l'ensemble des données à quelques variables synthétiques faisant apparaître pour chacune des préfectures des caractéristiques agronomiques particulièrement intéressantes. C'est ainsi qu'au Mayo-Kebbi et dans les deux Logone la liaison texture/matière organique est assez faible, et qu'il existe même un axe directeur où ces deux variables sont en corrélation négative au Mayo-Kebbi.

Nous observons également une certaine indépendance du potassium vis-à-vis des autres cations et de la capacité d'échange. Cette indépendance mériterait sans doute une étude approfondie pour mieux connaître la situation dans le sol du potassium qualifié d'échangeable.

On vérifie enfin que la capacité d'échange est en liaison très étroite avec la matière organique et l'argile. Les colloïdes organiques sont certainement prépondérants dans la définition du complexe absorbant si l'on en juge par les coefficients de corrélation partielle.

$$\text{Capacité échange (0-40 cm)} = 0,06 \text{ argile \%} + 4,66 \text{ Matière organique \%} - 0,97$$

$R = 0,92$ expliquant 84 % de la CEC.

- Corrélation partielle argile = 0,36 expliquant 13 % de la CEC.
- Corrélation partielle matière organique = 0,84 expliquant 71 % de la CEC.

2. Explication de la variabilité des rendements observés (P1). Régression avec les variables pédologiques

L'analyse statistique des données a été réalisée par le Service Biométrie-Informatique de l'I.R.C.T. (A. JOLY). Cinq situations anormales ont été éliminées du fichier des données. L'analyse porte donc sur 79 situations.

L'analyse du sol doit nous permettre d'estimer son incidence sur les rendements observés. Toutefois, les corrélations simples entre variables montrent que les liaisons sont très complexes.

La matrice du tableau 26 correspond aux coefficients de corrélation établis avec les variables d'origine.

Trois variables présentent des distributions non normales (Ca échangeable, capacité d'échange et P total), elles ont été transformées en \sqrt{x} ; on a également retenu une autre variable explicative, la somme des bases échangeables. La nouvelle matrice de corrélation figure au tableau 27.

Les corrélations observées entre le rendement en coton-graine et les variables pédologiques ne sont pas obligatoirement des relations de cause à effet, elles correspondent également à des relations parallèles en raison de la co-linéarité entre les variables explicatives. Pour palier en partie cette difficulté nous pouvons utiliser une régression multiple progressive ; dans cette régression, les variables sont ajoutées une à une et ne sont conservées dans l'équation explicative que si leur coefficient de corrélation partielle est significativement différent de zéro.

Cette analyse conduit à retenir 5 variables explicatives d'importance statistique très distincte. Le coefficient de corrélation multiple $R = 0,704$ expliquant 49,6 % de la variabilité des rendements se décompose comme suit :

- Somme des bases échangeables explique 40,6 % de la variabilité
- Potassium échangeable explique 3,2 % de la variabilité
- Matière organique totale explique 2,5 % de la variabilité
- Capacité d'échange explique 1,7 % de la variabilité
- Argile + limon explique 1,6 % de la variabilité
- Total 49,6 %

TABLEAU 26. — *Corrélations. Moyennes. Ecart-types. Données d'origine.*

Horizon 0-40 cm	Argile + Limon %	Mat. org. totale %	Phosphate total p.p.m.	Calcium éch. meq/100	Magnésium éch. meq/100	Potassium éch. meq/100 g	Capacité éch. meq/100	pH eau	Rendit P1 cot.-gr. kg/ha
	A + L	MOTOT	PTOT	CA ECH.	MG ECH.	K ECH.	CEC	PH EAU	RENDT
A + L	1,000								
MOTOT	0,620	1,000							
PTOT	0,490	0,729	1,000						
CA ECH.	0,499	0,791	0,855	1,000					
MG ECH.	0,628	0,677	0,392	0,659	1,000				
K ECH.	0,315	0,469	0,384	0,508	0,611	1,000			
CEC	0,712	0,847	0,737	0,846	0,766	0,500	1,000		
PH EAU	-0,200	-0,024	-0,108	-0,043	0,090	0,436	0,049	1,000	
RENDT	0,384	0,564	0,515	0,616	0,524	0,515	0,504	0,022	1,000
Moyenne	12,456	0,695	145,177	1,932	0,466	0,118	2,713	6,397	1 571,30
Ecart-type	5,327	0,212	94,694	1,027	0,180	0,052	1,199	0,509	677,55

TABLEAU 27. — *Corrélations. Variables transformées.*

	A + L	MOTOT	MG ECH.	K ECH.	PH EAU	SBAS	RCA	RPTOT	RCEC	RENDT
A + L	1,000									
MOTOT	0,620	1,000								
MG ECH.	0,628	0,677	1,000							
K ECH.	0,315	0,469	0,611	1,000						
PH EAU	-0,200	-0,024	0,090	0,436	1,000					
SBAS	0,543	0,811	0,751	0,578	0,070	1,000				
RCA	0,501	0,791	0,685	0,520	0,088	0,988	1,000			
RPTOT	0,503	0,729	0,403	0,400	-0,063	0,818	0,833	1,000		
RCEC	0,713	0,835	0,772	0,515	0,106	0,865	0,842	0,730	1,000	
RENDT	0,384	0,564	0,524	0,515	0,022	0,637	0,618	0,515	0,489	1,000

SBAS = Sommes des bases échangeables.

RCA = $\sqrt{\text{CA ECH.}}$

RPTOT = $\sqrt{\text{PTOT.}}$

RCEC = $\sqrt{\text{capacité d'échange CEC.}}$

3. Discussion

Les variations de la composition du sol sont à elles seules susceptibles d'expliquer 49,6 % de la variabilité des rendements observés ; c'est là le fait essentiel qui ressort de l'analyse statistique des données recueillies sur l'ensemble de la zone cotonnière du Tchad au cours des deux années 1981 et 1982 en 74 localités distinctes.

Les rendements présentant une très grande amplitude de variation allant de 305 à 3 556 kg/ha de coton-graine, toute action sur le sol est donc susceptible d'avoir un effet important sur la production.

L'analyse de cet « effet sol » pour tenter de dégager les variables les plus discriminantes doit être abordée avec beaucoup de prudence en raison des liaisons très complexes entre variables explicatives. Il sera toujours illusoire, quelle que soit la méthode employée, de vouloir isoler les effets propres de chacune des variables et de les additionner pour retrouver l'effet global. Nous l'avons cependant fait au paragraphe précédent pour 5 variables mais pour montrer l'ambiguïté de l'interprétation agronomique nous donnons ci-après l'explication obtenue avec 2 de celles-ci, Mat. org. et potassium échangeable, $R = 0,63$ expliquant 40 % de la variabilité dont 23 % pour la matière organique et 17 % pour le potassium. L'explication globale est donc très proche de celle donnée par les 5 variables précédentes mais avec des incidences très différentes pour chacune d'entre elles.

La régression orthogonalisée après analyse en composantes principales est sans aucun doute la plus rigoureuse en se limitant à retenir comme variables synthétiques les axes directeurs les plus représentatifs toujours indépendants entre eux et ceci sans distinguer un effet propre aux variables élémentaires qui les composent.

L'agronome dispose cependant d'informations qui lui permettent de dépasser le formalisme de l'analyse statistique et de mieux estimer le rôle effectif joué par chacune des caractéristiques du sol.

Nous savons notamment que la somme des bases échangeables et la capacité d'échange dépendent de la matière organique ; si statistiquement la somme des bases échangeables explique mieux la variabilité des rendements, il n'en demeure pas moins pour l'agronome que le rôle essentiel revient à la matière organique dont les effets se manifestent sur la production par une meilleure nutrition hydrique, azotée et cationique.

4. Conclusion

La variabilité des rendements du cotonnier que nous avons étudiée dans le temps à Bébedjia après 15 années d'exploitation suivant diverses modalités et dans l'espace sur l'ensemble de la zone cotonnière du Tchad présente une grande unité.

L'amplitude de cette variabilité est la même suivant les deux dimensions, temps et espace. En 1978 à Bébedjia les rendements des 39 parcelles témoin varient entre 133 et 3 425 kg/ha et ceux des 84 localités participant à l'étude régionale entre 301 et 3 556 kg/ha (Parcelle P1).

Les facteurs pédologiques expliquent 67 % de cette variabilité à Bébedjia et 50 % sur l'ensemble de la zone cotonnière bien que les rendements y correspondent à deux années successives 1981 et 1982.

La matière organique du sol apparaît donc dans les conditions actuelles de production comme le facteur principal du rendement du cotonnier et la grande similitude de son évolution dans le temps et dans l'espace indique que les différences observées régionalement seraient dues peut-être autant au mode d'exploitation des sols qu'à leur nature propre. On remarque d'ailleurs dans la zone cotonnière une certaine liaison entre la fertilité et la densité de population.

Ces observations indiquent la ligne de conduite à tenir pour améliorer les rendements dans le respect de la fertilité du sol. Dans l'immédiat, la fertilisation minérale doit pallier les insuffisances du sol ; elle est assurée d'un effet positif notamment par des apports d'azote en relation avec la pauvreté des sols en matière organique. Les parcelles 1982 dispersées chez les cultivateurs illustrent bien le rôle de l'azote dans la fertilisation minérale :

P0	N = 0 kg/ha	Rendement = 1 163 kg/ha
P1	N = 19 kg/ha	Rendement = 1 409 kg/ha
P2	N = 50 kg/ha	Rendement = 1 716 kg/ha
P3	N = 60 kg/ha	Rendement = 1 821 kg/ha

La réponse apparaît linéaire sur la figure 2 avec un accroissement moyen de 10,8 kg de coton-graine par kg d'azote.

Rendement coton-graine kg/ha.

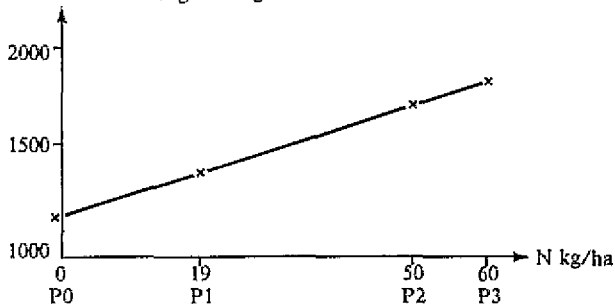


Fig. 3. — Réponse aux apports d'azote en 1982.

A long terme, il faut rechercher des systèmes qui améliorent ou tout au moins maintiennent la teneur du sol en matière organique à un niveau acceptable ; en outre, ces systèmes devront comporter une fertilisation assurant un bilan minéral équilibré. Nous entendons par bilan minéral le rapport entre les éléments apportés par les engrais et ceux exportés par les cultures. On a toujours observé dans les essais réalisés par l'IRCT en Afrique tropicale qu'il y avait, après plusieurs années d'exploitation, une corrélation étroite entre les teneurs du sol en N, P205 et K20 et le bilan minéral du système. Cette règle doit être respectée avec beaucoup de rigueur au Tchad pour le potassium.

A partir de 1980, nous avons implanté au Tchad différents systèmes de cultures répondant à ces conditions ; nous avons déjà une première information sur les rendements auxquels ils conduisent, mais il faut attendre plusieurs rotations pour se prononcer sur l'évolution de la fertilité des sols.

III. SYSTÈMES TECHNIQUES EXPÉRIMENTÉS DANS LA ZONE COTONNIÈRE DU TCHAD

1. Rôle des systèmes, leur implantation au Tchad

Le système technique est l'étape ultime de la recherche en agronomie ; on y étudie les effets directs et les interactions de tous les facteurs qui sont apparus nécessaires et efficaces pour assurer un niveau de production attractif pour le cultivateur dans le respect de la fertilité du sol.

Il est nécessaire de distinguer les systèmes techniques des systèmes de production qui prennent en compte également les facteurs humains. Certains souhaiteraient étudier conjointement l'ensemble des facteurs de production naturels, techniques, économiques et sociaux ; bien que leur interdépendance soit évidente, il nous semble cependant préférable de marquer des étapes, les schémas les plus complexes étant rarement les plus précis et surtout les plus accessibles. Les responsables du Développement demandent avant tout aux agronomes des bases techniques assurées pour définir leurs systèmes de production.

Un système technique est réalisé en vraie grandeur, sa superficie représentant l'unité de travail (ou un multiple de celle-ci) d'une famille en culture manuelle, d'un attelage s'il y a traction animale ou du tracteur dans une exploitation motorisée. Les informations produites sont multiples : à court terme, on y observe le niveau des productions en fonction du programme de fertilisation, les organismes chargés du Développement peuvent en retirer des itinéraires techniques rapidement vulgarisables pour une ou deux cultures mais ce n'est qu'après deux ou trois rotations que l'on peut porter un jugement définitif sur l'évolution de la fertilité du sol, critère essentiel de la validité du système.

Plusieurs systèmes ont été mis en place par l'IRCT au Tchad à partir de 1980.

1980 : Station IRCT de Bébedjia. En motorisation.

1981 : Krim-Krim, Centre de formation agricole ONDR, Logone occidentale. Culture attelée.
Village de Bitanda, Logone orientale. Culture attelée.

1982 : Bendone (Logone orientale), Danamadji (Moyen-Chari). Centres de formation agricole des missions catholiques. Culture attelée.

Nous décrivons les deux systèmes de Bébedjia et de Danamadji : le premier conduit en culture motorisée sans participation du bétail au maintien de la fertilité minérale et le second en culture attelée avec utilisation de la terre du parc à bétail.

2. Le système de Bébedjia

a) Définition du système

Succession des cultures

La rotation est le cadre du système ; elle s'établit avec les cultures couramment pratiquées dans la région où susceptibles de s'y développer. La succession tient compte de l'effet précédent cultural et de celui des légumineuses sur la nutrition azotée des autres cultures. La jachère naturelle de courte durée a pour but de régénérer la matière organique du sol.

L'effet des précédents culturaux a été étudié dans de nombreux essais par l'IRAT et l'IRCT dans les zones soudanienne et soudano-sahélienne, les résultats en sont très concordants. On peut admettre que l'arachide est la culture la mieux adaptée après une jachère enfouie immobilisant une partie de l'azote minéral ; l'arachide et le maïs sont de bons précédents pour toute culture. Il n'est jamais souhaitable de répéter la même culture deux années consécutives, le sorgho est toujours un mauvais précédent d'où sa position en fin de rotation qui permet en outre de recycler naturellement les tiges qui immobilisent beaucoup de potassium et dont la restitution mécanique au sol est impossible en culture attelée.

Le niébé (*Vigna unguiculata*) est associé au sorgho avec semis simultané ; on a remarqué, en effet, que le développement concomitant des deux plantes limite ou supprime celui du striga (*Striga senegalensis*), plante parasite des racines du sorgho, véritable fléau des régions soudanaises. Il faut cependant être vigilant au départ de la végétation pour équilibrer sorgho et niébé et que l'un ne concurrence pas l'autre. Il n'est pas impossible, en outre, que le niébé, par ses nodosités, favorise la nutrition azotée du sorgho si l'on en juge par l'aspect de la végétation du sorgho au mois d'octobre. Nous rapportons dès maintenant l'intérêt possible de l'association au semis du sorgho et du niébé en raison de l'importance considérable qu'elle présenterait si les premières observations se confirmaient.

La rotation suivante tient compte des précédentes observations.

- 1^{re} année = jachère naturelle améliorée.
- 2^e année = jachère naturelle améliorée.
- 3^e année = arachide.
- 4^e année = coton.
- 5^e année = maïs puis niébé.
- 6^e année = coton.
- 7^e année = sorgho et niébé.

Fertilisation

L'action sur la fertilité du sol a deux objectifs principaux, l'entretien ou même l'amélioration de la teneur organique du sol et l'équilibre du bilan minéral du système avec les rendements attractifs pour le cultivateur.

L'amélioration organique est recherchée par l'enfouissement de la jachère naturelle ; plusieurs études réalisées par l'IRCT en région soudanaise, dont l'essai X de Bébedjia, montrent que seule la jachère est capable d'apporter au sol une masse suffisante de matière cellulosique pour compenser un taux de minéralisation voisin de 4 % par an. Le fumier de ferme a sans doute un effet positif sur les cultures par ses éléments minéraux mais sa préparation et son transport présentent de telles contraintes qu'on ne peut, dans le cadre d'une exploitation, épandre plus d'une dizaine de tonnes de matière fraîche par hectare tous les quatre ou cinq ans.

Nous avons estimé dans le système de culture de Bébedjia en 1981 la composition d'une jachère et la mobilisation minérale et organique (carbone) à laquelle elle conduit par hectare avec une biomasse voisine de 10 tonnes de matière sèche concernant uniquement les parties aériennes. Il serait intéressant d'inclure dans cette étude le système racinaire. Les données figurent au tableau 28.

TABLEAU 28. — Composition d'une jachère et mobilisation par hectare.

	N	P	K	Ca	Mg	S	C
Composition % matière sèche.	0,28	0,33	1,43	0,19	0,16	0,035	48,2
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	S	C
Mobilisation kg/ha (10 tonnes matière sèche).	28	75	173	27	27	3,5	4 820

Il est clair que l'on a tout intérêt à favoriser une croissance rapide de la jachère et c'est pour cette raison que nous envisageons une jachère naturelle améliorée.

L'amélioration de la jachère consiste à l'ensemencer en juin avec des andropogonées à forte végétation, récoltées en octobre, pour assurer une couverture du sol rapide et uniforme. On peut également envisager d'apporter une partie de la fertilisation minérale du système que les cultures retrouveront ensuite.

Cette recommandation, dont la vulgarisation est bien sûr difficile à proposer, est illustrée par les résultats d'une expérience pluriannuelle conduite au Togo à Toaga. On a pu mettre en évidence dans cette étude une interaction positive entre la durée de la jachère et la fertilisation des cultures sur la matière organique du sol. Cette interaction diffère significativement de zéro au niveau de probabilité $P = 1 \times 10^{-4}$ (tableau 29).

TABLEAU 29. — Interaction durée de jachère \times fertilisation sur la matière organique du sol (Toaga, Togo, L. RICHARD).

	Pas de jachère	Jachère 2 ans	Jachère 3 ans
Cultures non fertilisées	0,51	0,65	0,58
Cultures fertilisées	0,51	0,66	0,68

La conduite de la jachère demande également des soins particuliers pour qu'elle soit efficace. L'enfouissement ou la restitution au sol de 10 tonnes de matière sèche à l'hectare sans avoir recours au brûlis est possible en culture motorisée mais présente des difficultés certaines avec la traction bovine. Actuellement, nous préconisons de rabattre, en 1^{re} année de végétation, en octobre pour éviter qu'elle ne brûle et en 2^e année un peu plus tôt en septembre pour que les pailles partiellement décomposées puissent être enfouies grossièrement fin octobre ; le labour est renouvelé en mai avant les semis d'arachides.

La fertilisation minérale (tabl. 30) a été établie sur les bases suivantes :

- Fertilisation azotée propre à chaque culture suivant les exigences connues en vue d'atteindre un rendement attractif pour le cultivateur.
- Fertilisation phosphopotassique permettant a priori d'équilibrer le bilan minéral en tenant compte cependant des bonnes réserves en phosphore total des sols de Bébedjia.
- Apport d'une partie de la fertilisation sur la jachère pour favoriser son action sur l'entretien organique du sol, les éléments apportés étant remis à la disposition des cultures par l'enfouissement de cette jachère.

b) Premiers résultats

Les rendements des quatre premières années (tabl. 31) sont très satisfaisants ; rappelons qu'ils ont été obtenus sur des parcelles de 4 000 m², superficie très représentative du milieu réel.

Si l'on estime les exportations en N, P₂O₅ et K₂O à partir des rendements moyens et d'après les normes proposées pour chaque culture par l'IRCT et l'IRAT en diverses situations, on observe en comparant les tableaux 30 et 32 un déficit en phosphore et en potassium.

Le bilan minéral réel d'un système de cultures est difficile à établir car il comporte des facteurs peu accessibles comme les pertes par drainage interne ou immobilisation et les apports occultes par les pluies, les poussières ou la fixation de l'azote atmosphérique. Cependant les études conduites par l'IRCT, notamment par C. MEGIE et O. DOGNIN au Tchad, montrent qu'un bilan succinct limité aux apports d'engrais et aux exportations par les cultures est en bonne corrélation avec l'évolution du sol. Pour N, P et K, les teneurs du sol ne varient pas avec un bilan équilibré, elles diminuent ou elles augmentent s'il est négatif ou positif.

Il faudrait donc, en principe, augmenter la fertilisation potassique du système pour respecter la règle du bilan minéral équilibré. Toutefois, cette révision ne s'impose pas encore si l'on en juge par l'effet de la jachère sur le potassium échangeable (tabl. 33) ; il est préférable de laisser évoluer fertilité et rendement avec la fertilisation actuelle

de 180 kg d'engrais par hectare cultivé et par an qui se situe dans des limites raisonnables vis-à-vis des possibilités du milieu producteur. En outre, les exportations en K_2O du système, d'après le tableau 32, proviendraient surtout des tiges de cotonnier. Il est possible qu'en les brûlant les pertes soient inférieures aux estimations. Le calcul des exportations réelles du système sera envisagé dans les années à venir.

Le sol a été analysé chaque année avant et après jachère ; dans le tableau 33 nous observons un effet probable de celle-ci dans l'horizon 0-20 cm sur les teneurs en matière organique, en magnésium et surtout en potassium. Dans l'horizon 20-40 cm cet effet n'est pas sensible. Il faut attendre que ces tendances se précisent avant d'en tirer des conclusions, mais dès à présent la jachère paraît bien jouer le rôle que nous lui avons fixé.

TABLEAU 30. — *Fertilisation du système.*

Culture	Engrais, kg/ha	Fertilisation, kg/ha					
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	B ₂ O ₃	
Jachère 1	Urée Chlorure de potassium	100 kg/ha 50 kg/ha	45		30		
Jachère 2	Urée Chlorure de potassium	100 kg/ha 50 kg/ha	45		30		
Arachide	Engrais coton : 21-12-18-6-1,8	100 kg/ha	21	12	18	6	1,8
Coton	Engrais coton : 21-12-18-6-1,8 Urée à 40 jours Reliquat azote arachide	150 kg/ha 50 kg/ha 30	32 22 30	18	27	9	2,7
Maïs	Urée au semis Urée épiaison mâle	50 kg/ha 50 kg/ha	22 22				
Coton	Engrais coton : 21-12-18-6-1,8 Urée à 40 jours	150 kg/ha 50 kg/ha	32 22	18	27	9	2,7
Sorgho- Niébé	Néant						
Total			293	48	132	24	7,2

TABLEAU 31. — *Rendements observés.*

Année	Pluviométrie (mm)	Parcelle 1	Parcelle 2	Parcelle 3	Parcelle 4	Parcelle 5	Parcelle 6	Parcelle 7
1980	1 128	Sorgho 1 668 (grain)	Arachide 2 234 (gousse)	Coton 2 140 (cot. gr.)	Maïs 605 (grain)	Jachère	Coton 1 988 (cot. gr.)	Jachère
1981	1 120	Jachère	Coton 3 229	Maïs 2 588	Coton 1 997	Jachère	Sorgho 1 895	Arachide 3 564
1982	1 025	Jachère	Maïs 2 095	Coton 3 601	Sorgho 1 453	Arachide 2 768	Jachère	Coton 3 139
1983	650	Arachide 1 858	Coton 2 612	Sorgho 2 571	Jachère	Coton 2 691	Jachère	Maïs 2 069

TABLEAU 32. — *Estimation des exportations.*

Culture	Rendements moyens	Exportation production végétale	Estimation éléments exportés en kg/ha		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Arachide	2 600 (gousses)	Les gousses et les fanes exportées.	52	17	43
Coton	2 600 (cot. gr.)	Coton-graine exporté. Les feuilles tombent au sol. Tiges et carpelles sont brûlés sur le terrain en andains légers.	65	31	58
Maïs	2 000 (épis)	Exportation des épis. Les tiges sont incorporées mécaniquement.	36	10	7
Coton	2 600		65	31	58
Sorgho	1 900 (grains)	Grain exporté. Les tiges se décomposent naturellement dans la jachère.	38	14	10
Total			256	103	176

TABLEAU 33. — *Analyse du sol avant et après jachère.*

Laboratoire analyse des sols GERDAT Montpellier	0-20 cm					20-40 cm				
	Avant jachère		Après jachère			Avant jachère		Après jachère		
	Par-celle 6	Par-celle 4	Par-celle 7	Par-celle 5	Par-celle 1	Par-celle 6	Par-celle 4	Par-celle 7	Par-celle 5	Par-celle 1
	1981	1982	1981	1982	1983	1981	1982	1981	1982	1983
Arg. %	6,2	5,6	4,3	5,0	4,1	8,7	9,0	10,9	9,9	9,6
Lim. %	2,5	0,1	2,8	2,8	3,2	2,5	2,8	2,2	2,2	3,4
STF. %	4,0	5,2	3,7	5,8	4,7	3,8	5,1	4,4	5,6	4,9
SF. %	23,2	24,9	19,6	28,2	19,1	14,6	21,5	24,5	20,6	20,6
SG. %	64,1	64,2	69,6	58,2	68,9	70,4	61,7	58,1	61,8	61,5
Mat. org. tot. %	1,11	1,06	1,20	1,65	1,15	0,77	1,68	0,68	0,79	0,74
N total ‰	0,37	0,45	0,46	0,71	0,65	0,30	0,34	0,30	0,40	0,42
C/N	17	14	15	13	10	15	12	13	11	10
P ppm	341	191	300	379	367	382	243	276	365	457
Ca éch. meq/100 g	4,33	2,39	4,25	3,70	4,36	5,08	1,94	3,13	2,86	4,18
Mg éch. meq/100 g	0,57	0,40	0,60	0,62	0,75	0,44	0,82	0,37	0,44	0,54
K éch. meq/100 g	0,17	0,13	0,30	0,29	0,38	0,24	0,12	0,18	0,15	0,19
Na éch. meq/100 g	0,01	0,02	0,01	0,02	0,06	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01
Somme éch. meq/100 g	5,08	2,94	5,16	3,63	5,55	5,77	2,40	3,64	3,47	4,92
Cap. éch. meq/100 g	4,95	3,13	4,60	5,29	5,77	4,33	3,15	4,10	3,91	4,84
Taux satur. %	—	94	—	88	96	—	77	88	89	—
pH eau	6,95	6,75	7,15	7,25	6,50	7,85	6,55	7,15	7,10	6,50

3. Le système de Danamadji avec traction bovine

a) Participation du bétail d'exploitation à la fertilisation des cultures

L'intégration agriculture-élevage dans les systèmes d'exploitation est depuis longtemps un des vœux du Développement en Afrique tropicale. Cet objectif très souhaitable est cependant bien imprécis tant les deux composantes sont vastes et complexes ; ce n'est que par étapes successives et dans des situations limitées que l'on pourra progresser vers cette intégration.

L'exploitation en traction animale offre dans ce sens un cadre contrôlé où le bétail qui fournit le travail peut également contribuer à la fertilisation.

Il faut distinguer en effet deux catégories de bétail en zone soudanienne, le bétail de rente ou mieux de prestige presque toujours confié à des pasteurs nomades et le bétail d'exploitation composé des attelages, des mères et des jeu-

nes qui participent à leur renouvellement. C'est ce troupeau sédentaire qui s'intègre aux cultures par son travail, par la pâture des résidus de récolte et par le fumier ou mieux la terre de parc épandue sur les champs cultivés.

Cette participation du bétail est une réalité notamment en Afrique de l'Ouest mais elle demande cependant à être étudiée. C'est le but du système Danamadji mis en place en 1982 par l'IRCT sur le Centre de formation agricole de la Mission Catholique (Centre Rakena).

b) Fertilisation par la terre de parc

C'est par le fumier de ferme que l'on envisage généralement la participation du bétail à la fertilisation, mais les contraintes sont telles que très vite en Afrique de l'Ouest les cultivateurs supprimèrent les apports de paille et n'appliquèrent aux cultures que la terre des enclos où le bétail est parqué ; c'est ainsi que la moitié des 60 000 hec-

tares en coton de la région de Koutiala reçoit 4 à 5 tonnes de terres de parc par hectare.

Le troupeau d'exploitation se nourrit sur les résidus de récolte pendant une période de l'année assez brève ; la majeure partie de l'alimentation est en fait assurée par les terrains de parcours à proximité de la ferme, les animaux reviennent chaque soir dans le parc et même quelquefois au milieu de la journée. En avril, avant les fortes pluies, on conseille de gratter le parc sur une épaisseur de 10 cm, la terre est mise en tas protégé des pluies par de la paille et elle est épanchée à la volée immédiatement avant le labour. Les mesures que nous avons faites indiquent que l'on peut récupérer 1,5 tonne de terre par tête et par an. Le parc est installé à proximité des terrains à fertiliser pour limiter les transports.

La composition des terres de parc est assez variable ; l'ensemble des analyses réalisées par l'IRCT permet de retenir la composition moyenne suivante :

N	= 1 % (matière sèche)
P ₂ O ₅	= 0,75 %
S	= 0,15 %
K ₂ O	= 1,6 %
CaO	= 1 %
MgO	= 0,5 %
pH	= 9

En culture attelée, on admet qu'une paire de bœufs labore et entretient annuellement une superficie de 4 hectares. Pour renouveler cet attelage il faut environ 6 mères et jeunes, d'où une présence de 8 à 10 têtes par unité de labour. Ce rapport bétail/surface permet d'appliquer en moyenne 3 tonnes de terre de parc par hectare et par an qui apportent les éléments suivants :

N	= 30 kg/ha
P ₂ O ₅	= 20 kg/ha
K ₂ O	= 48 kg/ha
S	= 5
CaO	= 30 kg
MgO	= 15 kg

Ces éléments proviennent des terrains de parcours, souvent impropres à la culture ; c'est donc un enrichissement du système alors que l'emploi du fumier correspond plutôt à un transfert d'éléments fertilisants à l'intérieur du système.

La terre de parc doit être considérée comme un engrais minéral et non organique ; le système de culture de Danamadji a été proposé de ce point de vue.

c) Définition du système

La rotation servant de cadre au système est identique à celle de Bébedjia ; les deux systèmes diffèrent par le travail du sol en traction bovine et par l'emploi de terre de parc comme fertilisant à Danamadji (tabl. 34).

d) Premiers résultats

Les rendements 1982 et 1983 sont les seules données dont nous disposons actuellement. Ces rendements se situent à un niveau très élevé (tabl. 35) ; bien que les apports d'engrais ne dépassent pas en moyenne 140 kg par hectare et par an, le bilan minéral est positif grâce aux apports de terre de parc (tabl. 36).

4. Conclusion

Les deux systèmes de Bébedjia et de Danamadji sont l'aboutissement logique et nécessaire des recherches développées en agronomie au Tchad par l'IRCT depuis une vingtaine d'années. Ils permettent de tester la cohérence des techniques mises en présence dans un même ensemble et d'observer l'évolution des rendements et de la fertilité du sol dans un système sédentarisé.

En outre, la comparaison entre Bébedjia et Danamadji où la même rotation est exploitée dans un cas en motorisation et dans l'autre en traction animale est du plus grand intérêt. Le tracteur permet un enfouissement aisé de la jachère et des résidus de récolte facilitant ainsi l'entretien organique du sol mais l'équilibre minéral du système est assuré uniquement par des engrais chimiques avec des risques d'acidification ; la traction bovine utilise au mieux les ressources locales en énergie et fertilisants mais la conduite de la jachère pose des problèmes difficiles à résoudre si l'on veut éviter de la brûler. L'un et l'autre systèmes présentent des avantages et des inconvénients qu'il faudra observer et analyser au cours des rotations successives.

TABEAU 34. — Fertilisation du système.

Culture	Engrais	Éléments fertilisants kg/ha				
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	S	B ₂ O ₃
Jachère						
Jachère						
Arachide	Engrais coton : 21-12-18-6-1,8 150 kg au semis.	32	18	27	9	2,7
Coton	Terre de parc 5 tonnes au labour. Urée à 40 jours 50 kg.	50 22	35	75	7,9	
Mais puis Niébé	Engrais coton : 21-12-18-6-1,8 150 kg au semis. Urée à la levée : 50 kg. Urée à l'épiaison mâle : 50 kg.	32 22 22	18	27	9	2,7
Coton	Terre de parc 5 tonnes au labour. Urée à 40 jours : 50 kg.	50 22	35	75	7,9	
Sorgho et Niébé	Engrais coton : 21-12-18-6-1,8 150 kg au semis. Urée à la floraison : 50 kg.	32 22	18	27	9	2,7
Total		306	124	231	42	8,1

TABLEAU 35. — Rendements en kg/ha. Sole de 3 000 m².

Année	Parc. 1	Parc. 2	Parc. 3	Parc. 4	Parc. 5	Parc. 6	Parc. 7
1982	Arachide 3 196 (gousse)	Coton 1 767 (Cot. gr.)	Maïs 4 263 (épis)	Coton 2 143 (cot. gr.)	Sorgho 270 (grains)	Jachère	Jachère
1983	Coton 3 460 (cot. gr.)	Maïs 4 763	Coton 3 450	Sorgho 1 888	Jachère	Jachère	Arachide 3 472

TABLEAU 36. — Estimation des exportations.

Culture	Rendements moyens en kg/ha	Exportation production végétale	Estimation éléments exportés en kg/ha		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Arachide	3 200 (gousses)	Gousses et fanes exportées.	64	21	53
Coton	2 700 (cot. gr.)	Coton-graine exporté. Les feuilles tombent au sol. Tiges et carpelles sont brûlées sur le terrain en andains légers.	67	32	60
Maïs	4 400 (épis)	Exportation des épis. Les tiges sont incorporées mécaniquement au sol.	79	22	15
Sorgho	1 800	Les tiges se décomposent naturellement dans la jachère.	36	13	9
Total			246	88	137

CONCLUSION

La valorisation du milieu, but de la recherche-développement, procède par la synthèse et l'adaptation de diverses solutions techniques à proposer aux cultivateurs.

Les références expérimentales recueillies en biologie, pédologie, climatologie et techniques agricoles conduisent à exploiter rationnellement une parcelle, les rotations possibles dépendant des contraintes naturelles et de l'éventail des cultures offert par le milieu. Le passage de la rotation à l'assolement, du système technique de culture au système de production est plus ou moins aisé suivant l'importance relative des contraintes et des potentialités mais il demande toujours une parfaite maîtrise de l'exploitation de la parcelle.

Dans cette étude, nous avons tenté de mettre en évidence une contrainte de première importance en région soudanienne, la fragilité de la fertilité des sols, et d'organiser quelques références sous forme de systèmes techniques pouvant concourir à une meilleure valorisation de la zone cotonnière du Tchad.

*
* *

Actuellement, la fatigue du sol se manifeste en culture cotonnière, notamment sous climat soudanien, par des accidents de germination et par la sénescence précoce des plantes avant même l'arrêt des pluies dans certains cas avancés. Ces symptômes se trouvent confirmés par l'expérimentation et l'analyse du sol ; nous avons montré la similitude de l'évolution de la fertilité dans le temps et de

sa variabilité géographique. Nous avons pu notamment expliquer par la composition du sol 50 % de cette variabilité observée sur deux ans et dans 79 localités de l'ensemble de la zone cotonnière ; même si le rendement moyen y augmente régulièrement par une meilleure technique de production, la fertilité des sols n'en est pas pour autant conservée. La variabilité des rendements provoquée ou observée entre 300 et 3 000 kg/ha de coton-graine montre l'acuité du problème. La richesse organique du sol et sa teneur en potassium échangeable seraient les deux facteurs qui expliqueraient le mieux cette variabilité.

Cette mise en garde n'est pas une condamnation des cultures de rente, bien au contraire, car les revenus qu'elles procurent sont indispensables à la transformation du milieu producteur. Un retour aux cultures traditionnelles et à la seule autosuffisance alimentaire seraient la négation du développement.

L'analyse de la situation et les solutions que nous venons de présenter montrent d'ailleurs qu'il y a une issue positive et que l'obtention de rendements attractifs pour le cultivateur dans le respect de la fertilité du sol pouvait être envisagée. L'adaptation de ces solutions au milieu producteur ne se fera que très progressivement en proposant aux cultivateurs des techniques conformes aux références organisées par la recherche, telles que suppression du brûlis des résidus de récolte, labour de fin de saison des pluies pour enfouir le maximum de matières organiques, fertilisation minérale conforme aux exportations des cultures. L'expérience prouve que tout progrès technique incite à la sédentarisation et à l'appropriation du sol sans lesquelles le maintien de la fertilité ne peut être assuré.

SUMMARY

Fertility can be examined according to various aspects ; for the agronomist and the pedologist, crop yield and soil composition are interdependent criterions of fertility that can be monitored over time in a given place, or observed in space. In this study, similar explanations are given to the high variability in cotton yields that was experimentally caused and regionally observed in Chad.

The major role played by soil organic matter and incidence of exchangeable potassium on production level is shown.

Farming systems are proposed and tested ; they give attractive yields for farmers and presumably preserve soil fertility.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé

Introduction

I — Evolution de la fertilité dans un essai pluriannuel (Bébedjia 1963 à 1978)

1. But de l'essai
2. Le sol
3. Dispositif expérimental
4. Analyse des rendements du cotonnier
5. Analyse du sol. Evolution
6. Liaison entre les rendements observés et l'analyse du sol en 1978
7. Conclusion

II — Analyse régionale de la fertilité

1. Analyse des sols de la zone cotonnière
2. Explication de la variabilité des rendements observés (P1). Régression avec les variables pédagogiques
3. Discussion
4. Conclusion

III — Systèmes techniques expérimentés dans la zone cotonnière du TCHAD

1. Rôle des systèmes. Leur implantation au Tchad
2. Le système de Bébedjia
3. Le système de Danamadj avec traction bovine
4. Conclusion

IV — Conclusion